

Análisis forense de inundaciones: una guía metodológica

• Aldo I. Ramírez* •

Centro del Agua para América Latina y el Caribe, México

• L. Alejandra Herrera-Lozano •

Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de San Miguel de Allende, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Ramírez, A. I., & Herrera-Lozano, L. A. (enero-febrero, 2015). Análisis forense de inundaciones: una guía metodológica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 25-48.

Se presenta una guía para el análisis forense de inundaciones, la cual se centra en la búsqueda de estrategias efectivas para incrementar el conocimiento del tema, sin cuestionar los conocimientos previos ya aceptados por la comunidad científica, pero sí estableciendo una participación de equipos multidisciplinarios. El sustento de la guía está basado principalmente en la integración de procesos hidrometeorológicos, hidrológicos e hidráulicos, incluyendo además el análisis de información tanto política como social. La aplicación sistemática de esta guía en los ámbitos municipal, estatal y federal permitiría estandarizar la información derivada de eventos inundantes y facilitaría la integración de bases de datos confiables, insumo de cualquier investigación, en este tema tan importante para muchos países.

Palabras clave: análisis forense, inundación, guía metodológica, análisis ex-post, fenómenos extremos.

Abstract

Ramírez, A. I., & Herrera-Lozano, L. A. (January-February, 2015). *Forensic Analysis of Floods: A Methodological Guide*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(1), 25-48.

A guide for the forensic analysis of floods is presented. It focuses on the search for effective strategies to increase knowledge about the subject without questioning previous concepts that have already been accepted by the scientific community while also establishing the participation of multidisciplinary teams. The guide is primarily based on the integration of hydrometeorological, hydrological and hydraulic processes, in addition to the analysis of political and social information. The systematic application of this guide in municipal, state and federal arenas will enable the standardization of information related to flood events and will facilitate the creation of reliable databases. These serve as the source of information for any investigation about this subject of importance to many countries.

Keywords: forensic analysis, floods, methodological guide, ex-post analysis, extreme phenomena.

Recibido: 12/01/12
Aceptado: 26/09/14

Introducción y conceptualización

Las inundaciones no son un fenómeno reciente; incluso el diluvio universal, que más allá de tintes religiosos ha sido estudiado de manera científica, es generador de varias teorías para su explicación (Blick, 1991). Sin embargo, es lógico pensar que la información sobre inundaciones es más abundante y está mejor documentada en los últimos siglos. Este tipo de eventos está entre los desastres asociados con fenómenos naturales más frecuentes y mortíferos, afectando

un promedio de 520 millones de personas al año. Casi la mitad de la gente que pierde la vida en “desastres naturales” de las décadas recientes ha sido víctima de inundaciones, mismas que también explican cerca de un tercio de pérdidas económicas en todo el mundo (UNESCO, 2008).

Dentro de la búsqueda constante para disminuir el impacto que causan las inundaciones en diferentes ámbitos, se han realizado innumerables investigaciones. Sin embargo, la mayoría de éstas se ven disgregadas entre las instituciones que las llevan a cabo, de acuerdo con su área del

conocimiento. Más aún, la realidad es que pocas veces se conjuntan los resultados, haciendo difícil obtener una herramienta sólida e integral que ayude a cumplir con evaluaciones objetivas. Es decir, no se ha desarrollado una metodología con criterios unificados que permita un análisis objetivo de las causas que hacen de un evento de inundación un desastre de alcances inconcebibles.

La ingeniería forense y, en particular, la hidrología forense, cuyo objetivo primordial es determinar la causa probable de un evento y las fuentes humanas que contribuyen a incrementar los daños, han sido poco explotadas en fenómenos de este tipo, desaprovechando así las ventajas que podrían proporcionar las investigaciones con dicho enfoque. Cualquier investigación de tipo forense tiene la finalidad predeterminada de establecer cómo ocurrió un hecho y, eventualmente, qué hacer para evitar su repetición. Los términos “forense” e “hidrología” fueron aplicados a subdisciplinas en las geociencias por primera vez durante el final de los años setenta del siglo XX, donde las preocupaciones acerca de la contaminación del suelo y las fuentes de agua venían a la vanguardia, mientras que por la década de 1990, las inquietudes evolucionaron al impacto de las actividades humanas en el ambiente. Hoy en día, las investigaciones de naturaleza forense ya incluyen la hidrología (Hurst, 2007).

La hidrología forense es parte de las disciplinas ambientales y además de estar referida a los temas de contaminación, también podría estar presente en temas como inundaciones, drenaje, recursos hídricos, bombeo o cualquier estructura hidráulica. Hay ocasiones en que la hidrología forense sirve para evitar daños mayores, mientras que en otras es útil para racionalizar el uso del recurso y su distribución.

El análisis forense de inundaciones es, entonces, la aplicación de una metodología después de sucedido el desastre y consta de la reconstrucción del evento para determinar cómo sucedió, qué factores contribuyeron, qué falló, cuáles fueron los protagonistas que

tuvieron relación con el daño. Después de esto, el análisis incluye la realización de una valoración o estudio del evento, teniendo claros los puntos ya expuestos. El objetivo final del análisis es sugerir lo necesario para la asistencia o mejora del sistema, y así evitar en lo posible este tipo de desastres en un futuro. El análisis de inundaciones debe integrar principios hidrometeorológicos, hidrológicos e hidráulicos, sociales y políticos, con la ayuda de herramientas tecnológicas para la modelación y simulación, para con ello distinguir las causas probables de los daños por inundación en una cuenca y poder documentar los factores clave implicados en dichos daños.

El objetivo de este documento es proporcionar una guía metodológica con base científica, que permita el análisis de inundaciones desde una perspectiva forense, unificando criterios de actuación y estableciendo pautas metodológicas para dicho análisis, lo que permite obtener resultados lo suficientemente objetivos como para planear estrategias de mitigación de sus efectos. En la guía se incluyen integralmente factores geográficos, hidrológicos e hidráulicos, sociales, políticos y económicos, y la forma de identificar cuáles intervinieron como los principales favorecedores o agravantes ante un evento de inundación. El énfasis de la guía, desde una perspectiva forense, se centra, por lo tanto, después de sucedido el evento; sin embargo, a fin de contar con información base para el análisis, se vislumbran algunas actividades que podrían realizarse en cualquier momento previo a la ocurrencia del fenómeno.

Guía metodológica para el análisis forense de inundaciones

En este documento se ha establecido el contenido deseable de una guía metodológica para el análisis forense de inundaciones. Cada apartado se discute con diferente detalle, pero siempre con el objetivo de ordenar las ideas y acciones que surgen en el proceso de evaluación de causas y efectos de estos desastres. La parte más relevante de la guía y, por ende,

sus actividades, se pone de manifiesto una vez que el evento causante de la inundación ya ha sucedido. Sin embargo, se establecen recomendaciones sobre las acciones que conviene llevar a cabo en forma rutinaria y no sólo ante la eventual perspectiva de ocurrencia de fenómenos. La guía metodológica se ha estructurado en tres tiempos: antes del evento de inundación, durante el evento y posterior al mismo (cuando ya se ha observado un impacto). Se presenta una organización básica de cinco fases, con un total de veinte etapas. El contenido ideal de un análisis forense de inundaciones contemplaría todas las etapas consignadas en el cuadro 1. El análisis podría

realizarse en la ausencia de alguna, pero siempre intentando dar cumplimiento a los requisitos establecidos, a fin de contar con una evaluación completa y objetiva.

Fase A. Recopilación e integración de información

A.1 Recopilación de información

La información que debe recabarse en forma documental tanto en las etapas previas a cualquier evento inundante como en las fases posteriores al desastre se enlista a continuación. En caso de que el evaluador forense tenga

Cuadro 1. Fases y etapas del análisis forense de inundaciones.

Fase	Etapas	Antes	Durante	Después
A. Recopilación e integración de información	1. Recopilación de información geográfica, hidrometeorológica, hidráulica y político-social			
	2. Estado y calidad de información hidrometeorológica e hidrométrica			
	3. Sistema de Información Geográfica			
	4. Caracterización geomorfológica de cuencas			
B. Análisis hidrometeorológico e hidrológico	1. Génesis de las tormentas			
	2. Distribuciones espacio-temporales			
	3. Análisis de series de tiempo y determinación de parámetros estadísticos			
	4. Análisis probabilístico de frecuencias			
	5. Estimación de lluvia en exceso (evento)			
	6. Establecimiento de periodos de retorno de precipitación y gasto (evento)			
	7. Modelación y simulación del proceso lluvia-escorrentamiento			
C. Análisis hidráulico	1. Modelación y simulación de la red de cauces, llanuras de inundación y zonas urbanas			
	2. Revisión de obras hidráulicas y de protección			
D. Análisis integrador	1. Revisión de planes y programas de acción y desarrollo			
	2. Análisis del manejo de la emergencia			
	3. Integración de los análisis hidrológicos e hidráulicos con otros factores			
	4. Generación de mapas de inundación y determinación de afectaciones en asentamiento humanos			
E. Diagnóstico final	1. Contraste con eventos históricos			
	2. Resumen objetivo de causas y efectos			
	3. Lecciones aprendidas y acciones propuestas			

la oportunidad de participar con el equipo encargado de la atención directa durante la emergencia, podría adquirir información adicional de gran valor, por constituir una fuente de primera mano. En general, la recopilación de información no es una actividad sencilla, puesto que tener acceso a todo lo aquí sugerido se ve obstruido en muchas ocasiones por la dispersión de dicha información en diversas instituciones y dependencias.

Geográfica

En la medida de lo posible, obtener antes, durante y después del evento de inundación datos geográficos, aspectos humanos, mapas temáticos, imágenes de satélite y fotografías aéreas, así como levantamientos topográficos previos, e imágenes de la zona de desastre en el nivel de cuenca, cauce y urbano, entre otros.

Hidrometeorológica

En cuanto a pronósticos y registros, la observación, interpretación y análisis de datos hidrometeorológicos suficientes es de primordial importancia. La información climatológica se recopila en estaciones convencionales (manuales) y en estaciones automáticas, usualmente digitales. Además, existen también observatorios meteorológicos, los cuales generan información meteorológica y climatológica del país tanto para el servicio de instituciones nacionales como para organismos internacionales. En general, los observatorios trabajan las 24 horas del día los 365 días del año de manera ininterrumpida y en ellos se realizan mediciones de los elementos del tiempo atmosférico cada tres horas. En el mejor de los casos, los datos hidrometeorológicos proporcionarán información del evento de lluvia en cuanto a su génesis, localización, extensión, magnitud, duración e intensidad.

Hidráulica

En este rubro se agrupa tanto la información hidrométrica de caudales como la información

sobre el estado de la infraestructura hidráulica. A saber:

- **Hidrometría.** La información de registros de carácter hidráulico estará centrada principalmente en datos hidrométricos, los cuales se refieren a la recopilación de los caudales que circulan por una sección dada de un río o canal. Dependiendo de la ubicación de ésta, los registros que se pueden tener son de caudales en ríos, de salidas de presas, caudales captados y entregados a sistemas de riego, o abastecimiento y niveles. Si fuera posible que el evaluador se integre a los recorridos realizados por las autoridades en la zona de desastre tanto aéreos como marítimos y terrestres, es deseable que se documenten en forma cuantitativa los niveles del agua a lo largo de tramos críticos y en la vecindad de estructuras que estén dentro del cauce o en sus márgenes, la velocidad del flujo y el transporte de sedimentos, entre otros.
- **Obras hidráulicas e infraestructura de protección existentes en el sitio o la cuenca.** Se recopilará la información de las obras hidráulicas presentes en la zona de desastre y en las cuencas de aportación. Las obras intervienen en la dinámica hidrológica e hidráulica de la zona de estudio de acuerdo con el propósito para el cual fueron construidas. En caso de que sea posible adquirir información en el momento preciso en que el evento se suscite, el evaluador deberá registrar particularmente y en forma detallada las políticas de operación seguidas y cualquier indicio sobre el posible daño estructural. En cuanto a los registros de caudales tanto de entrada como de salida, es pertinente verificar que la medición se esté realizando con la forma y frecuencia adecuadas. Se debe buscar considerar los datos de diseño, esto es, fecha de construcción, ubicación geográfica, uso, dimensiones y geometría, periodo de retorno, gastos, obras complementarias de la infraestructura; también es necesario

considerar las políticas de operación de diseño y reales, e información del flujo del evento de inundación. Las obras de protección contra inundaciones son críticas para la completa simulación del sistema que se encuentra en desastre.

Político-social

La incorporación de esta dimensión complementa en forma importante la información técnica, sobre todo en la etapa de evaluación de los impactos del evento. En este rubro se considera lo siguiente:

- Planes y programas de acción y desarrollo. Dado que el gobierno se establece como el principal responsable de atender desastres causados por inundaciones, es a través de ellos que se generan planes de acción y programas de desarrollo. Estos planes deben ser recopilados para su análisis posterior, pues darán la pauta para verificar las medidas preventivas y de preparación que tiene cierta zona ante contingencias. De igual forma es necesario recopilar lo referente a los programas de desarrollo, en donde se podrá apreciar la serie de acciones determinadas por el gobierno con la finalidad de mejorar las condiciones de vida y, por supuesto, al tenor de ese afán, prevenir situaciones de riesgo. No se deben dejar de lado los documentos de planeación municipales, cuya importancia es primordial cuando se trata el tema de ordenamiento territorial local, sobre todo puntualizando en la ocupación de áreas vulnerables.
- Daños causados. Los desastres naturales causan un número importante de víctimas fatales y cuantiosas pérdidas materiales, por lo que es adecuado tener una visión general de los daños causados en la zona afectada y así crear un contexto amplio sobre la repercusión del desastre en particular que se analiza, en la economía y en la sociedad, así como su impacto en la economía nacional. Lo ideal es hacer una evaluación completa de los daños, en el sentido de cuantificar económicamente las pérdidas, con el respaldo de alguna institución financiera y una metodología aceptada.
- Manejo de la emergencia. Los desastres de origen natural y antropogénico son tratados como un tema de asistencia humanitaria, orientando la acción hacia los preparativos para la atención de las emergencias y la reconstrucción posdesastre. Las acciones ante un riesgo latente y ante la emergencia como tal son importantes para evitar daños mayores a los inevitables. Es por ello que se debe conocer qué tipo de acciones fueron tomadas, para que en conjunto con la información técnica sea posible encontrar el factor de fallo en todo el sistema que comprende la zona afectada. Es necesaria la información relacionada con las acciones de previsión y alerta, así como de atención a la población durante la emergencia.
- Testimonios personales. Los testimonios de la población y de la gente involucrada en el desastre, ya sea de forma directa o indirecta, resultan muy importantes, pues proporcionarán información que difícilmente se encontrará en reportes técnicos. Además, brindará elementos sobre cómo se vivió dicho desastre, con detalles que pueden tener un gran valor en el análisis forense. Se deben documentar las entrevistas realizadas a afectados directos, observadores y autoridades.
- Registros históricos. Resulta adecuado contar con información histórica referida a eventos de inundación sucedidos en el pasado, como el historial sobre los eventos de inundación y destrucción que han azotado a la zona, las memorias en medios de comunicación, como radio, TV, diarios y, por supuesto, reportes técnicos de cada uno de los eventos de inundación, tantos como sea posible. Esta información permite realizar comparaciones y contrastaciones del evento analizado con otros previamente suscitados.

- Otros factores de influencia en la inundación. Existen factores que aunque no sean determinantes en la inundación pueden influir en ella en cierto grado. Aquí se pretende conocer qué tan correctamente se ha manejado la zona en forma integral, en aspectos íntimamente ligados con el plan de desarrollo. Se deben investigar los niveles de deforestación de la zona en desastre, así como otros cambios en el uso de suelo en las cuencas de aportación. También se debe investigar la venta de terrenos de bajo valor, pero con alto riesgo, así como la invasión de llanuras naturales de inundación; esto es, la no observancia de los planes de ordenamiento territorial. En el ámbito poblacional y de servicios municipales, es deseable contar con información de los niveles de marginación, sistemas de recolección de basura y cultura de los desechos.

La fase de recopilación será complementada con investigaciones de campo posteriores al evento, para actualizar la información que así lo requiera. Como resultado del análisis de la información es posible establecer sitios críticos para estudio de mayor detalle.

A.2 Estado y calidad de información hidrometeorológica e hidrométrica

Es posible que los registros de las estaciones tanto climatológicas como hidrométricas estén incompletos. Ante la potencial falta total de información tanto climatológica como hidrométrica se podría pensar en usar la información de cuencas vecinas en las cuales se hayan generado eventos similares. Ahora, para el caso de los registros de precipitación, el uso de métodos de generación indirecta de información, tales como la interpolación o la transposición de tormentas, restará significativamente la confiabilidad del análisis, por lo que en la medida de lo posible debe evitarse. Por ejemplo, en el caso de que falte información de precipitación, todavía queda la opción de utilizar sólo los registros hidrométricos.

En las estaciones hidrométricas, por su parte, la ausencia de información puede presentarse en lapsos en los que precisamente se dieron eventos importantes, en cuyo caso se puede acudir a métodos alternativos para completar información con base en otras estaciones cercanas que cuenten con registros. Por otro lado, puede que se trate solamente de pequeños huecos, donde el analista sea capaz de inferir la información mediante algún método de interpolación. En general, si en la cuenca de interés existe un registro de gastos, éste debe usarse de manera directa.

A.3 Sistema de información geográfica

Las ventajas de contar con un sistema de información geográfica (SIG) de la zona de estudio son evidentes. Desde el momento en que se identifica una cierta área de interés con potencial de sufrir daños por inundación, se recomienda la generación de un SIG, donde se vierta todo tipo de información geográfica, geomorfológica, climatológica e hidrométrica, que se vaya recopilando, para de esta forma manejar de manera integral toda la cartografía de la zona. En dicho sistema también es posible mantener capas de información social y económica, que en algún punto de la evaluación pueden aportar elementos importantes. Si se cuenta con el SIG en el momento de ocurrencia del evento, se podrá ingresar la información que se vaya recopilando en campo y con ello ir actualizando en tiempo real registros específicos que hagan de éste una herramienta dinámica altamente útil para los análisis posteriores. Si al momento del desastre no se cuenta con el SIG, debe considerarse seriamente la integración de uno para ese análisis específico, a fin de ir vertiendo en él toda la información recabada. En el SIG deben generarse en principio mapas base de la zona afectada y de las cuencas aportadoras. A manera de ejemplo, en la figura 1 se muestra el mapa base de la cuenca media y baja del río Grijalva, en el sureste de México, en el cual se ha delimitado el área de aportación, apreciándose el relieve.

A.4 Caracterización geomorfológica de cuencas

Para entender la dinámica hidrológica del proceso que haya experimentado una zona, se debe realizar un análisis que considere la modelación integral del sistema hidrológico de la cuenca afectada y sus cuencas aportadoras. Esto con el fin de tener clara la situación existente en la cuenca ante la ocurrencia del evento inundante.

Delimitación de la zona y caracterización de las cuencas

La delimitación de cuencas y subcuencas —tanto las afectadas por la inundación como las de aportación— se debe basar en criterios técnicos que tomen en cuenta las

características topográficas e hidrológicas del lugar. Se trazará el parteaguas, a fin de definir las cuencas que serán la base para la caracterización geomorfológica. Es deseable contar con un modelo digital de elevaciones (MDE), con una escala de por lo menos 1:25 000 según los recursos lo permitan, aunque para la cuenca alta se puede usar una escala 1:50 000 y para la planicie sería provechoso una escala 1:10 000. El MDE, además de permitir la representación gráfica de la forma y las elevaciones de la superficie en estudio, se convierte en una herramienta poderosa para los análisis subsecuentes, por ejemplo, para la obtención de datos morfométricos para el cálculo de los parámetros hidrológicos. Las cuencas, vistas desde un enfoque hidrológico, funcionan como un gran sistema que recibe las precipitaciones y las transforma en

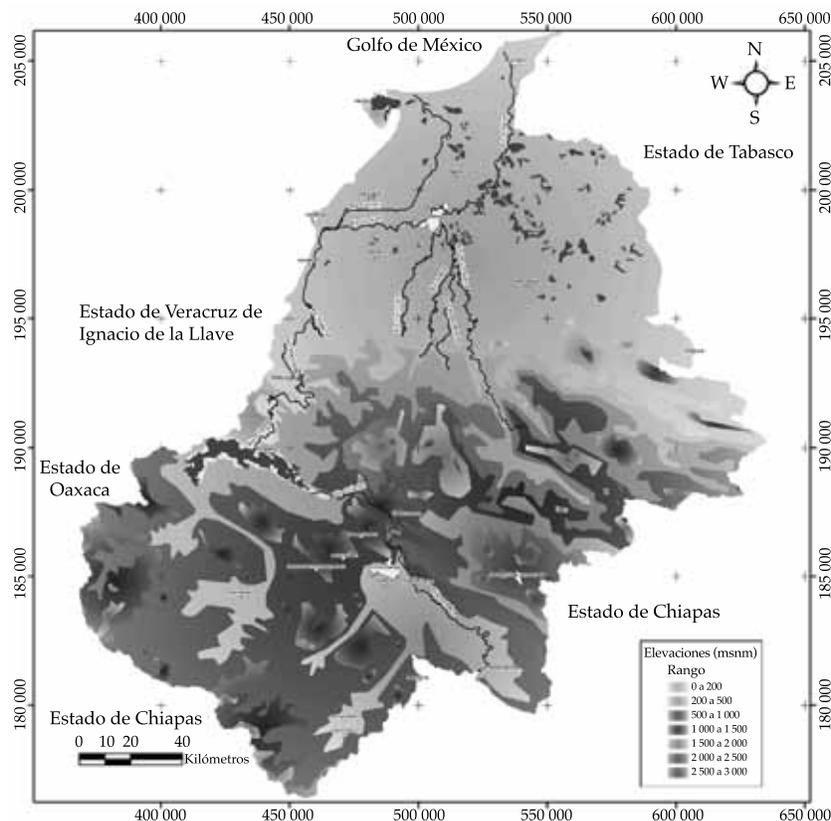


Figura 1. Cuenca media y baja del río Grijalva en un SIG.

escurrimiento. Esta transformación depende de una gran variedad de parámetros, por lo cual, para conocer el funcionamiento de la cuenca, se debe caracterizarla geomorfológicamente mediante los parámetros físicos, como la longitud y pendiente de la cuenca y del cauce, y parámetros de relieve, como las curvas hipsométricas, así como información sobre el tipo y uso del suelo, y la cobertura vegetal. Para todos estos elementos, el SIG se constituye como la herramienta ideal de análisis y visualización.

Fase B. Análisis hidrometeorológico e hidrológico

En definitiva, esta etapa del análisis es una de las más críticas de la metodología. La comprensión de los procesos hidrometeorológicos e hidrológicos en la cuenca se constituirá en la base del estudio y sobre ésta se apoyará el entendimiento del evento que generó los problemas de inundación.

B.1 Génesis de las tormentas

Para el análisis forense de inundación resulta primordial conocer la génesis de la tormenta generadora del evento inundante. Se entiende como una tormenta a un conjunto de lluvias de características bien definidas que obedecen a una misma perturbación meteorológica. Ésta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aun días; asimismo, puede abarcar, especialmente, desde pequeñas zonas hasta vastas regiones. La escala temporal y espacial del estudio de una tormenta está dividida en dos escalas: mesoescala, con sistemas en una escala horizontal de varios cientos de metros a kilómetros y con una duración de unas cuantas horas, tales como las tormentas convectivas, las circulaciones de brisas, y los vientos de montaña y valles; por otro lado están las de escala sinóptica o escala grande o ciclónica, con varios cientos de kilómetros y una duración de varios días o semanas, tales como los ciclones de latitudes

medias. Así pues, la información generada por los reportes sinópticos, así como los boletines y pronósticos que emite la autoridad competente, deben ser suficiente para establecer la génesis del fenómeno ocurrido y de igual forma para dejar claro si fue un solo fenómeno o una combinación con otros.

B.2 Distribuciones espacio-temporales

La distribución espacial se estudia mediante los denominados mapas de isocontenidos, que están formados generalmente por isolíneas o líneas que unen puntos de igual valor. Existe *software* para la construcción de estos mapas con muy diversos métodos de interpolación, aunque la mayoría de las veces, si se quiere ir más allá de las técnicas convencionales, se requiere de un refinamiento con criterios personales. Los mapas de isolíneas permiten visualizar la distribución de las variables y obtener información sobre su evolución espacial. La distribución temporal se representa a través de gráficos de evolución temporal, los cuales representan la variación de cualquier variable con el tiempo en un punto determinado. Esta información permite manifestar tendencias y detectar variaciones estacionales. La cantidad de precipitación en una región hidrológica es uno de los factores climáticos que mayor variabilidad registra año con año. Esta variabilidad no está sólo referida al tiempo sino también al espacio, lo que significa que la lluvia depende de las condiciones locales (Gutiérrez, Aparicio, & León, 2005). Para la representación de la lluvia dentro de la cuenca afectada y de las cuencas aportadoras se puede obtener una distribución de la lluvia mensual, tomando en cuenta la totalidad de las estaciones y de los registros, que proporcionará información sobre los meses donde se concentra mayormente la precipitación. Asimismo, se pueden generar gráficos para la representación de la precipitación acumulada mensual para cada una de las estaciones, con la finalidad de hacer evaluaciones parciales en cada una de ellas; todo lo anterior como análisis antecedente y

marco de referencia. De igual forma se pueden construir curvas masa media para determinar la variación en el tiempo de la precipitación media en la cuenca. Para reconstruir el campo de lluvias que ocurrió antes y durante el fenómeno de inundación se deben realizar mapas de isoyetas (Ramírez, 2012), para visualizar la distribución espacial de la tormenta, con duraciones que pueden ir desde 5 minutos hasta más de 96 horas, y así identificar el foco y la evolución de las tormentas, según sea necesario.

B.3 Análisis de series de tiempo y determinación de parámetros estadísticos

El análisis de series de tiempo es una herramienta útil para examinar la evolución del clima pasado y presente. De acuerdo con Escalante y Reyes (2005), las series de tiempo son un conjunto de observaciones realizadas en forma secuencial, normalmente a intervalos iguales, y presentan características estadísticas que muestran su tendencia en el comportamiento. Las series de tiempo pueden ser anuales o periódicas, y dentro de estas últimas, estacionales, mensuales, semanales, diarias u horarias. Las series de tiempo pueden ser univariadas o multivariadas, dependiendo de si se trata de una o varias variables, respectivamente. Éste puede ser un análisis básico, pero fundamental en todo estudio. Con tales medidas se persigue plasmar en pocos indicadores el conjunto de observaciones de una variable y describir con ellas ciertas características de grupos, logrando una comparación más precisa de los datos, que la que se puede conseguir con tablas y gráficas. Además, estos estadísticos descriptivos serán de utilidad para el cálculo de los parámetros de las funciones en el análisis de frecuencias. Si se quisiera profundizar más en el tema, se puede hacer uso de metodologías de hidrología estocástica. El proceso estocástico se caracteriza porque tiene una tendencia general o componente determinística y un cierto grado de incertidumbre o componente aleatoria del evento. Este análisis se realiza tanto con los registros históricos de precipitación como de escurrimiento en la zona de estudio.

B.4 Análisis probabilístico de frecuencias

El análisis de frecuencias consiste en la asignación de la frecuencia de excedencia o el intervalo de recurrencia de los eventos. La aproximación matemática al análisis de frecuencias se basa en una distribución de probabilidad. Los parámetros de la distribución de probabilidad están definidos como funciones de las estadísticas de las observaciones (WMO, 1994), y definen propiedades de ubicación, escala, forma y asimetría, entre otras propiedades. Existen varias técnicas de estimación de parámetros, entre los que destacan los métodos de momentos y de máxima verosimilitud (Kite, 1988). El análisis probabilístico de frecuencias es simplemente un procedimiento para estimar la probabilidad de excedencia de eventos futuros o pasados (Haan, 1986). Para los fines de este estudio, lo que se requiere es determinar la probabilidad de excedencia del propio evento inundante. Debido a que el gasto máximo y su correspondiente hidrograma están controlados por muchos factores climáticos y fisiográficos, su estimación más confiable se basa en el procesamiento probabilístico de la información de las crecientes observadas, ya sean de gastos o niveles. Por otra parte, el análisis probabilístico de las lluvias máximas o precipitaciones extremas permite la construcción de las curvas intensidad-duración-periodo de retorno, las cuales caracterizan a las tormentas en la región de estudio. Estas curvas son también una herramienta invaluable para la determinación de escurrimientos en cuencas no aforadas. Una vez que ya se ha recabado la información hidrometeorológica e hidrométrica, se ha verificado la calidad de la misma, así como obtenido los estadísticos muestrales y parámetros estadísticos, se puede realizar el análisis probabilístico de frecuencias. La longitud mínima recomendada por varios autores va desde 10, 20, hasta 25 años (Esparza, 2005). En forma general, tanto para registros de precipitación como para registros de flujo, el procedimiento que se debe seguir para

continuar con el análisis hidrológico de esta guía es ajustar los datos a varias funciones mediante un proceso analítico, después seleccionar la distribución de mejor ajuste, para con ella evaluar las magnitudes de los eventos para diferentes probabilidades de ocurrencia o periodos de retorno. Cualquiera que sea el análisis en este sentido, se realiza tanto con datos de precipitación como de escurrimiento (si es que estos últimos existen).

B.5 Estimación de lluvia en exceso o efectiva del evento

La lluvia en exceso es la diferencia entre la lluvia total registrada y las abstracciones hidrológicas. Se trata entonces de la precipitación que no es interceptada, no es retenida por la superficie, no se infiltra y no se evapora. Así, es la precipitación efectiva o en exceso la que genera el escurrimiento directo a la salida de la cuenca. En el caso de cuencas aforadas, se tendrá un registro simultáneo de precipitación y escurrimiento de una tormenta, por lo que la lluvia en exceso se calcula a partir del gasto directo determinado del hidrograma de la avenida, mediante la división del volumen de escurrimiento directo entre el área de la cuenca. Por otro lado, si no se conocen las abstracciones, como en el caso de cuencas no aforadas, se utilizan métodos específicos para ese fin, como el modelo del número de curva desarrollado por el *Natural Resources Conservation Service* (NRCS, 1986). De acuerdo con la información recolectada, se elegirá el procedimiento a aplicar para el análisis forense de inundaciones.

B.6 Establecimiento de periodos de retorno de precipitación y gasto del evento

El periodo de retorno (T) se debe entender como el intervalo de tiempo en que, en promedio y a la larga, un evento de una magnitud dada puede ser igualado o excedido (Aparicio, 2005). En término de probabilidades, el periodo de

retorno es el inverso de la probabilidad de excedencia de dicho evento, $T = 1 / P(X \geq x)$. En virtud de la no linealidad de la relación lluvia-escurrimiento, debe diferenciarse entre el periodo de retorno para lluvias y gastos. El periodo de retorno de una determinada lluvia no es el mismo que el periodo de retorno del escurrimiento generado por esa misma lluvia. Aldama, Ramírez, Aparicio, Mejía y Ortega (2006) han demostrado ya matemáticamente que el periodo de retorno de una tormenta difiere del periodo de retorno de la avenida que produce, aunque son pocos los esfuerzos que se han hecho por establecer la naturaleza de dicha no linealidad. Eagleson (1972) fue el primero en abordar esta temática y analizarla de forma analítica. Este proceso por naturaleza es complicado, sin embargo, el contenido de humedad del suelo al momento del evento de precipitación es una variable clave en el análisis, así como los cambios en la vegetación, el uso del suelo y las actividades antropogénicas en la cuenca. Por tanto, una lluvia de 100 años de periodo de retorno no necesariamente genera un gasto de 100 años de periodo de retorno. Es probable que en una cuenca sujeta a urbanización o deforestación crecientes, una misma lluvia genere escurrimientos con periodos de retorno cada vez mayores.

Se propone estimar el periodo de retorno asociado con el evento inundante de la siguiente forma: ubicar el gasto asociado con el evento inundante en la lista de probabilidades asignadas mediante una fórmula de posición de graficación, como la fórmula de Weibull (Kite, 1988), considerando que en el registro no se incluyó el valor del evento en cuestión, sólo los valores históricos, o sea, sólo los registros hasta el año anterior al que sucedió la inundación. Si este gasto se encuentra dentro de las magnitudes registradas en los datos históricos, fácilmente se podrá asignar un periodo de retorno a dicho evento. Sin embargo, si el gasto se ubica fuera de las magnitudes de los registros, entonces el periodo de retorno T del evento inundante se puede calcular a partir del ajuste de los registros

a la FDP una vez más, considerando que en el ajuste no se incluyó el valor del evento en cuestión. Para este caso, aunque el gasto tenga una magnitud mayor que la de los históricos, será posible extrapolar, para asociarlo con un periodo de retorno. Con estas dos formas de asignación de T , se pretende que dicho valor no se vea influenciado por la longitud del registro y la propia magnitud del evento. Después se puede integrar el valor del gasto asociado con el evento inundante a los registros históricos, lo que dará como resultado una modificación tanto en el ajuste de los registros a la FDP como en los valores para el intervalo de recurrencia mediante la posición de graficación y, por consiguiente, se tendrá que el valor de T que se asignó también se verá modificado. Con lo anterior se pretende esclarecer el hecho de que la asignación de probabilidad de ocurrencia es evolutiva y no estática.

B.7 Modelación y simulación del proceso lluvia-escurrimiento

Los flujos de agua que son provocados por la precipitación se estiman con modelos lluvia-escurrimiento, los cuales pueden ser parte del proceso de evaluación del sistema de respuesta de las cuencas analizadas ante un evento de inundación. Los métodos de simulación por medio de *software* se tornan más eficientes y confiables para calcular el escurrimiento a partir de la lluvia, ya que permiten un análisis relativamente detallado, utilizando intervalos pequeños de tiempo. Entonces, si no hay registros hidrométricos disponibles o son muy limitados para una interpretación o extrapolación confiable, las relaciones lluvia-escurrimiento pueden ser muy útiles por su habilidad de inferir información de flujo a partir de registros de precipitación.

Para la modelación del proceso lluvia-escurrimiento, las condiciones iniciales de humedad de la cuenca al comienzo de la tormenta son importantes, al igual que las características de ésta, como la cantidad de precipitación, intensidad y duración.

La precipitación antecedente, un concepto derivado de las lluvias en el pasado inmediato, es el aspecto más importante para la humedad de la cuenca. En general, se considera una función exponencial o inversa del tiempo, de forma que las precipitaciones más recientes serán las mayormente influyentes en la humedad antecedente. Para el análisis de tormentas complejas y de larga duración, es necesario separarlas en tantos intervalos como sea posible. De acuerdo con Linsley, Kohler y Paulhus (1990), en cuencas pequeñas, menores de 250 km², es posible considerar una intensidad promedio dada por la duración y cantidad total de la precipitación, sin mayor pérdida de información. Con independencia del modelo a utilizar para la simulación del proceso lluvia-escurrimiento, es preciso que se contemple una fase de calibración. La calibración permite determinar con suficiente exactitud bajo condiciones específicas cuál es el valor de los errores en los resultados de un modelo o medición con respecto a un patrón de referencia. Es de vital importancia que dichos errores sean lo suficientemente pequeños y que hayan sido determinados con la mayor exactitud posible. Un método de apoyo, sobre todo para la calibración en un punto del modelo a construir, es usar el método de sección-pendiente, el cual se basa en la fórmula de Manning y permite con las huellas del evento y las características geométricas y de rugosidad del cauce hacer una buena estimación del caudal máximo transitado en cuencas no aforadas.

En el mejor de los casos, se contará con un modelo lluvia-escurrimiento ya desarrollado para la cuenca en estudio, pero si no es el caso debe evaluarse la oportunidad de implementar uno. En el primer caso, el modelo puede operarse con los datos de lluvia del evento inundante y observar los escurrimientos resultantes, y compararlos con los observados. Independientemente de la existencia de diferentes modelos lluvia-escurrimiento, se deben tener en cuenta las limitaciones de cada uno de ellos al aplicarse a la zona y con la información con que se cuente.

Fase C. Análisis hidráulico

El análisis hidráulico tiene por objeto obtener representaciones con buena aproximación del comportamiento hidrodinámico natural de los sistemas e infraestructura hidráulica, y aquellas condiciones que intervinieron o formaron parte en el evento. Como herramienta se tomará la modelación como una representación simplificada de un sistema real.

C.1 Modelación y simulación hidráulica de la red de cauces, llanuras de inundación y zonas urbanas

Para simular o reproducir el comportamiento hidrodinámico de una red de cauces es necesario llevar a cabo el proceso de modelación. Se busca contar con un modelo hidráulico avanzado para la cuenca en estudio. Para lograrlo, es necesario conocer la geometría de los cauces y las variables hidrodinámicas del sistema, para así comparar los resultados del modelo con lo observado en la realidad, y contar con un modelo hidráulico calibrado que permita analizar de forma certera lo sucedido durante el evento de inundación.

Para la integración inicial del modelo hidráulico, es necesario conocer algunas variables geométricas de la red de cauces, como el eje del cauce, características por sección, elevaciones y profundidades. Esta información generalmente se obtendría de campo, por lo que los levantamientos topográficos directos serían ideales, sin embargo y como se ha venido recomendando, el uso del SIG facilitará los procesos, por lo que este caso no será la excepción. Al contar con la información topográfica del terreno de por lo menos una escala 1:5 000, se pueden obtener detalles después del análisis del MDE, pero se debe tener en cuenta la topografía del cauce para poder escoger una buena escala y con ello generar secciones que proporcionen las características ya mencionadas. Asimismo, es necesario conocer algunas características adicionales, como el tipo de material de la pared del cauce, lo cual se puede obtener

en investigaciones de campo. A todo lo anterior se debe agregar la información sobre el flujo, la cual fue generada en el análisis hidrológico. También se deben considerar las obstrucciones presentes en el cauce —puentes, por ejemplo— y ubicación de estructuras como presas, cárcamos de bombeo, etcétera. Para la modelación se debe tener claro el tipo del flujo. En canales abiertos, el flujo puede clasificarse en muchos tipos y describirse de varias maneras. Será importante decidir si lo conveniente es una modelación en flujo no permanente, para tomar en cuenta el efecto transitorio de los caudales. Una modelación en flujo mixto (dando la oportunidad de considerar flujo subcrítico y supercrítico) será también siempre deseable. La consideración de flujo espacialmente variado será, en la mayoría de los casos, también obligada. De igual forma, y como información para la modelación, es necesario determinar el régimen de flujo de la corriente. Éste se clasifica en función del número de Froude, relación adimensional entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales en estado crítico; subcrítico donde el flujo tendría una velocidad baja, y supercrítico donde el flujo tendría una alta velocidad (Chow, 1994).

Una de las características importantes del cauce es el coeficiente de rugosidad, el cual es el valor que representa la resistencia al flujo por fricción, comúnmente considerado a través de la n de Manning. Chow (1994) menciona una guía para la determinación correcta del coeficiente de rugosidad de Manning, que consiste en cuatro enfoques generales. Es necesario entender los factores que afectan el valor de n , con el fin de adquirir el conocimiento básico del problema y disminuir el rango de incertidumbre; consultar una tabla de valores comunes para n para canales de diferente tipo; examinar y familiarizarse con la apariencia de algunos canales comunes, cuyo coeficiente de rugosidad se conoce; determinar el valor de n mediante un procedimiento analítico basado en las distribuciones de velocidad teóricas en la sección transversal de un canal, y en los datos de medición de velocidad o de rugosidad.

La modelación y simulación se han de hacer para las condiciones de funcionamiento normal de la red, así como para la eventualidad de la inundación. Los niveles aquí resultantes serán de primordial importancia, pues son ellos la variable principal en la generación de los mapas de inundación. La modelación hidráulica de la red de cauces proporcionará la información suficiente para la determinación del comportamiento general y del evento extraordinario de dicha red, al igual que los límites de la llanura de inundación en funcionamiento normal y zonas de inundación en eventos extraordinarios. Esta información es importante, puesto que una vez que se delimite la llanura de inundación y se determine si en ella existen asentamientos humanos, se debe llevar a cabo un análisis hidráulico de la zona urbana, para establecer cuán afectada resulta la dinámica de la ciudad, para lo cual también podría simularse el funcionamiento hidrodinámico en las calles.

En general, para la evaluación del análisis hidráulico en la zona urbana, se deben tomar en cuenta parámetros como el tirante del agua, la velocidad, la permanencia de la inundación y la aportación de sólidos.

Los procesos erosivos y de sedimentación provocan daños, como reducción de la productividad del suelo, pérdida y degradación de la tierra, sedimentación de embalses, sedimentación en zanjas de drenaje y canales, así como daños a la infraestructura hidráulica. Los daños de mayor interés para este caso son los ocasionados en la infraestructura que se encuentra circundante o dentro del cauce, al igual que la modificación en la capacidad de conducción del mismo. La primera afectación por socavación y la segunda por sedimentación.

El aumento de la velocidad más allá de un cierto límite o la turbulencia produce socavación. Las avenidas extraordinarias pueden poner en riesgo la infraestructura presente en cauces, por lo que puede ser un factor decisivo para que se agrave una emergencia debida a una avenida extraordinaria. Es por ello que la socavación es un factor a tomar en cuenta

en el presente análisis. La erosión puede desestabilizar la estructura en su totalidad si la socavación se acerca a la cimentación de la obra hidráulica (Wang *et al.*, 2014). De igual forma, un nivel de inundación puede afectar un cauce debido a que podría causar socavación en el fondo de éste, lo cual comprometería las secciones superiores del talud y podría provocar el desplome de las mismas. Por tanto, se debe revisar el diseño estructural de la cimentación de la obra, poniendo especial atención a la fecha de construcción y de reparaciones que se hayan hecho en ella, así como niveles de cimentación e históricos de inundación. Lo que se pretende es analizar el comportamiento que han tenido las estructuras y cimientos, en busca de evidencias de daños e investigar razones de las reparaciones.

Por consecuencia, se requiere determinar la profundidad de socavación relacionada con el evento extraordinario estudiado, para lo cual existen métodos como el de Lischtván-Levediev (Maza, 1987). Con lo anterior se tendrán los elementos para analizar el comportamiento de las estructuras y el cauce.

La modificación en la capacidad hidráulica de un cauce se puede ver afectada debido a que tanto éste como sus respectivas llanuras de inundación están compuestos por sedimentos no consolidados que se erosionan rápidamente durante inundaciones y crecidas de agua. Si durante una inundación el río acarrea sedimentos algo gruesos, éstos tienden a ser depositados a lo largo del fondo del cauce, provocando la formación de un dique natural. Ello puede llevar a que el fondo del cauce aumente y, por lo tanto, los niveles de agua, representando así un potencial de inundación mucho mayor. Un caso muy peculiar que puede aumentar el riesgo de inundación es el deslizamiento de tierra, sea natural o inducido. En este caso, la cantidad de sedimentos a ser transportados por el río aumenta, disminuyendo la capacidad hidráulica o, en el caso más desfavorable, obstruyendo el cauce.

Además está la formación de mareas, pues la sobre elevación del nivel del mar puede actuar

como factor para agravar una inundación sucedida en territorio interno cercano relativamente a la costa o bien ser la causante de una inundación costera. Desde cualquiera de los dos enfoques, los niveles del mar tanto históricos como asociados con el fenómeno deben estudiarse. La sobreelevación del mar puede ser por tres tipos diferentes (además de la marea astronómica): el rompiente de oleaje, el arrastre del viento y la marea de tormenta (USACE, 2008). Los tres tipos de sobreelevación pueden ocurrir de forma combinada, aun ello predomina uno u otro, en dependencia de la configuración costera. Para el análisis de este factor, se debe contar con información del fenómeno que provocó el aumento de los niveles del mar, los propios niveles del mar medidos antes y durante el evento, y la extensión y duración de la inundación costera. Ello dará la pauta para analizar su combinación con otros factores. La inundación costera se puede ver involucrada principalmente en el hecho de obstruir el escurrimiento natural hacia el mar, así como en el desagüe de sistemas de drenaje, además, claro, de sus respectivas afectaciones en la zona costera.

C.2 Revisión de obras hidráulicas y de protección

Para este apartado se debe hacer uso de la información recolectada acerca de las obras, así como la información generada del análisis hidrológico con y sin la inclusión del evento de inundación. Principalmente la revisión de las obras hidráulicas está enfocada a comparar los valores originales de diseño con la información generada del análisis hidrológico para el evento de inundación que se está estudiando, esto es, de acuerdo con los caudales máximos obtenidos de dicho análisis, se deben aplicar esos valores al funcionamiento de las obras y compararlo con el teórico de acuerdo con sus capacidades y diseño. En este sentido, es pertinente observar que la falla de las estructuras podría obedecer tanto a la magnitud del evento que supere al de

diseño como a la falta de robustez estructural de las mismas (Holický & Sýkora, 2009). Sin embargo, puede presentarse el caso en que no se cuente con la información o procedimientos seguidos en el diseño de las obras; si ello ocurre, se tendría que revisar con las políticas de operación actuales, en sustitución de los valores de diseño. Con base en lo anterior se analiza el estado general y diseño de las obras, para definir si éste fue un factor fundamental en el desastre ocurrido. Las obras a revisar son las siguientes:

Embalses y presas

El proceso convencional de diseño de un vaso consiste en determinar una avenida de diseño a través de un análisis de frecuencias, donde se acepta un nivel de riesgo mediante la asignación de un periodo de retorno. Esta avenida de diseño será el pivote de los análisis, pues se verificará la condición actual del embalse de acuerdo con los datos de diseño para después estudiar los volúmenes transitados normalmente y al final el volumen asociado con el evento particular estudiado. En general, se pueden mencionar dos enfoques para estimar avenidas de presas (Aldama *et al.*, 2006): el enfoque hidrometeorológico, donde se trata de analizar registros de precipitación y convertirlos en escurrimiento por medio de modelos lluvia-escurrimiento, a través de los cuales se puede obtener el hidrograma completo de la avenida y el enfoque hidrométrico, en el cual se realiza un análisis de frecuencias de gastos máximos anuales; una vez que se estima el gasto pico asociado con un periodo de retorno, se procede comúnmente a “mayorar” la avenida, esto es, suponer que la forma de hidrograma es la misma que la de la creciente máxima registrada. Es deseable incluir el enfoque bivariado, en el que se habla de un análisis de frecuencias conjunto, lo cual permite asignar un periodo de retorno al hidrograma completo de una avenida y no como en el análisis hidrométrico convencional, que sólo implica referirse al periodo de retorno del gasto pico y no del periodo de retorno del

hidrograma completo (Ramírez & Aldama, 2000).

Estaciones de bombeo

Generalmente las estaciones de bombeo son usadas para desalojar las aguas residuales o pluviales de una zona que por sí misma no puede drenarse por gravedad y con ello evitar encharcamientos. Otra de las funciones de las estaciones de bombeo es servir directamente como protección a inundaciones, por ejemplo, en avenidas máximas mantener el nivel de algún canal o dren, transportando el agua por medio de estaciones de bombeo a algún cauce con mayor capacidad. Los factores de las estaciones de bombeo que principalmente serán revisados corresponden a su ubicación y funcionamiento. Para verificar el funcionamiento de las bombas, generalmente no se cuenta con toda la instrumentación para efectuar una prueba en donde se revise el comportamiento completo. Sin embargo, basado en la información del fabricante, como la curva de comportamiento, el equipo debe cumplir haber operado bajo determinadas condiciones, para así asegurar que el funcionamiento fuera adecuado. Existen dos parámetros que se deben determinar: la carga total y el caudal. En vista de que la mayoría de las instalaciones cuentan con medidor de caudal, la tarea restante consiste en la determinación de la carga total. Conociendo esta última, la prueba de verificación del funcionamiento se realiza al localizar la intersección de estas dos variables en la curva del fabricante, la cual debe estar muy próxima al punto de diseño de la bomba. Para cualquiera de las dos funciones aquí mencionadas para las estaciones de bombeo, la falla resulta un factor importante a tomar en cuenta para evaluar la gravedad de la inundación y sus correspondientes afectaciones.

Canales y drenes

Aquí se analizan solamente los cauces modificados y artificiales construidos para

mejorar el sistema hidráulico de la zona. La revisión será cualitativa, principalmente, verificando los datos de diseño, como el talud, las velocidades mínima y máxima del flujo, y los criterios que se utilizaron para estimar el bordo libre, así como la zona de inundación respectiva al cauce. La pendiente longitudinal es una de las variables hidráulicas de mayor importancia en la energía del río y es por ello que los cauces necesitan un espacio de movilidad fluvial donde desborde el agua en crecidas y disipar su energía. Se deben revisar entonces las características de diseño del cauce, así como la evolución histórica de éste y las características actuales antes de la inundación, para referir si algún factor en la evolución del cauce o dren pudo haber sido decisivo y agudizar con ello dicha eventualidad. Se deben buscar relaciones de degradación o mejoras, así como describir las deficiencias de las estructuras presentes sobre el cauce y su funcionamiento. Finalmente, la revisión cualitativa de los cauces y drenes estará implícita en el análisis de los resultados de la modelación hidráulica.

Sistemas de abastecimiento de agua potable

Los sistemas de abastecimiento de agua potable pueden llegar a fallar en eventos de inundación y dejar a la población sin servicio, lo cual representa principalmente problemas de salud pública. Debido a ello, el estudio de estos sistemas se convierte en un factor de análisis como parte del enfoque forense de inundaciones. Para el análisis de este tipo de obras hidráulicas, los factores más importantes son la ubicación, específicamente de la línea de conducción desde la fuente, así como el tipo y medio de abastecimiento. Dependiendo de la fuente de abastecimiento se deriva el problema relacionado con la inundación: desde una presa o embalse, el problema principal podría estar dado por una falla en la cortina y por consiguiente en la obra de toma; en los casos en los que el abastecimiento es por bombeo desde un pozo hasta un tanque, el abastecimiento se verá suspendido si las bombas son alcanzadas

por el nivel de la inundación. Después de revisar la fuente de abastecimiento y verificar si hubo alguna falla, se deben buscar fallas en la línea de conducción. Se pueden tener diferentes tipos de instalación de estas líneas de conducción desde enterradas, a nivel o elevadas. En cualquiera de los tipos de instalación anteriores, si la línea de conducción se ubica en la planicie de inundación de un cauce, ésta podría romperse por la fuerza que ejerza el agua sobre ella. Por lo anterior, debe revisarse la topografía de donde se ubica el sistema, los materiales de la tubería, cruceros y piezas especiales. Entonces, el sistema de abastecimiento de agua potable puede fallar debido a inundaciones en obras de cabeza principalmente. Es por lo expuesto ya, que en estos casos el gasto de la creciente y los gastos de diseño cobran un papel secundario.

Sistemas de drenaje

La función principal de los sistemas de drenaje es conducir las aguas residuales o pluviales captadas en los sitios de asentamientos humanos hasta sitios donde no provoquen daños e inconvenientes a los habitantes (Conagua, 2007). Para los sistemas de drenaje, ya sea sanitario, pluvial o combinado, el factor más importante para que éste falle es que se vea sobrepasado en su capacidad; por tanto, en lo que se necesita poner la mayor atención es en las características de diseño de la tubería, esto es: gasto de diseño, diámetro y material. De igual forma, se deben revisar las velocidades de diseño, las de funcionamiento real y las presentadas durante el evento de inundación, así como la presión en conductos que trabajen bajo ese precepto. Además de lo anterior, el arrastre de materiales o basura hacia el sistema pueda ser de consideración, lo cual obviamente genera problemas tanto para el desalojo del exceso de agua en calles como para el tránsito del flujo en el interior de las tuberías. Con esto, aunque sea difícil tener evidencias justo antes del evento, será posible inferir una tendencia en el comportamiento general de esas acciones, lo cual será de ayuda para esclarecer si el sistema

falló por cuestiones de diseño o por motivos externos. El método más utilizado para la revisión y el diseño de sistemas de drenaje ha sido el método racional, sin embargo también se podría utilizar el hidrograma unitario instantáneo en caso de contar con mediciones simultáneas de gastos a la salida de la cuenca urbana y lluvia en algunos puntos dentro de ella, o bien si se carece de hidrometría, también puede usarse el concepto de hidrograma unitario sintético (Ramírez, 2012).

Infraestructura de protección

Para el diseño de obras de protección contra inundaciones, se toma en cuenta como parámetro principal el periodo de retorno al que se asocia la avenida de diseño. Los periodos de retorno se relacionan con las características del área a proteger. Si alguna obra de protección de las enlistadas anteriormente o alguna otra presente en la zona de estudio falló durante la contingencia, se llevará a cabo la revisión de su funcionamiento para encontrar la causa de tal fallo.

Fase D. Análisis integrador

D.1 Revisión de planes y programas de acción y desarrollo

En un plan de desarrollo visto como una herramienta de gestión que busca promover el desarrollo social en una determinada región se intenta mejorar la calidad de vida de la gente y atender las necesidades básicas insatisfechas. Aun cuando las organizaciones civiles pueden trabajar por el desarrollo de la sociedad, el concepto de plan de desarrollo suele estar emparentado con la acción del Estado, sus políticas y estrategias. Se debe revisar que las políticas y estrategias concentradas en los planes de desarrollo sean claras y precisas y, por supuesto, que se hayan ejecutado o estén en proceso. Se debe revisar el seguimiento de estas acciones, pues al tratarse de visiones estratégicas de futuro, por ofrecer soluciones

que se mantengan en el tiempo, su importancia recae en el ámbito de lo vital para la población, su seguridad y bienestar. Se debe investigar que los planes hayan sido diseñados para ser sostenibles, con mejoras que queden en la sociedad, aun cuando el plan ya haya concluido. En este sentido, se buscará que un plan de desarrollo enseñe a la población a tratar con los riesgos latentes y no que dirija totalmente las acciones a sólo la restauración, aun siendo ésta la medida que secunda la acción principal, promoviendo así la autosuficiencia. Un plan de desarrollo implica compromiso político para llevarlo a cabo y, por supuesto, requiere de una inversión monetaria que permita concretar los proyectos. Se debe seguir sin entrar a niveles de auditoría los montos invertidos en los proyectos y realizar una especie de análisis costo-beneficio con corte a la fecha del desastre ocurrido, tratando de discernir entre la aplicación de estos recursos y los beneficios conseguidos. No se debe dejar de lado que como parte de los planes de desarrollo están temas como zonas de reforestación, zonas protegidas que están en relación directa con niveles de tala y deforestación de la zona en desastre, así como otros cambios en el uso de suelo en las cuencas de aportación, lo cual puede ser analizado con mapas históricos de vegetación y uso de suelo, para así ver la evolución de la zona. También se deben investigar los planes de ordenamiento territorial, en donde se buscará ubicar la venta de terrenos de bajo valor, pero con alto riesgo, averiguando la concentración de asentamientos humanos vulnerables, así como la invasión de llanuras naturales de inundación tanto para asentamientos urbanos como para zonas de comercio u otros usos y, sobre todo, averiguando la legalidad de dichas ocupaciones emparentadas con el mismo plan. Es importante conocer también los niveles de marginación relacionados con zonas de ocupación de alto riesgo, los factores que influyen para que la población radique en esos lugares y si el gobierno es sensible a dicha situación de riesgo y, en su caso, qué acciones se han tomado al respecto.

Finalmente, pero no menos importante, es el análisis de los sistemas de recolección de basura y cultura de los desechos, especificando puntos de concentración de los desechos, días de recolección, destino; en general, obligaciones municipales y la cultura popular de los desechos en conjunto, buscando que esto no haya sido un factor que haya acrecentado el impacto del desastre, principalmente por la disminución en la capacidad de drenaje en las zonas urbanas.

D.2 Manejo de la emergencia

El manejo de la emergencia comprende desde las acciones que anteceden a ella hasta la atención inmediata a la población e infraestructura durante el desastre (DGPC, 2006). Las acciones de previsión y alerta se pueden resumir prácticamente en programas a diferentes niveles y áreas. Entre éstos se encuentran los programas en el ámbito social y de instituciones para la difusión y el conocimiento de la población ante los riesgos a los que están expuestos. Estos programas son principalmente de los gobiernos federal y local, debido a que en ellos recaen las funciones de Protección Civil estatal y municipal. Asimismo, se debe reconocer el valor de los programas para el monitoreo en tiempo real de eventos que pongan en riesgo a la población, conocidos como sistemas de alerta temprana; o en su caso, la ausencia de este tipo de herramientas. Las acciones de atención a la población durante la emergencia podrían convertirse en el eje de todos los procedimientos planteados a realizar ante una emergencia, pues todo lo que se haga debe estar fundamentado en la protección y salvaguarda de la población, más allá de pérdidas económicas. Las acciones son el resultado de la planeación y lo proyectado en los programas, por lo que para la reducción del impacto durante el desastre se debe asegurar una adecuada preparación. La revisión de este rubro debe estar enfocada a los programas con los que cuenta la zona estudiada, dirigido en específico al grado de avance, eficiencia

y legitimidad en la ejecución de ellos, pues de la correcta aplicación de estos programas depende el éxito en los objetivos que en cada uno de ellos hayan sido planteados. Si los programas analizados no fueron ejecutados según lo planeado, identificando la causa para que ello sucediera, esto puede convertirse en un factor determinante para magnificar la magnitud del desastre.

D.3 Integración de los análisis hidrológicos e hidráulicos con otros factores

En este apartado se deben integrar en un solo análisis conjunto todos los factores técnicos involucrados en la inundación y sumar ahora los factores de carácter social y económico que se hayan podido obtener. Esto es, los planes de ordenamiento territorial y de desarrollo, grado de marginación de la población y manejos de los desechos, entre muchos otros. Sería idílico pensar que se tienen en consideración todos los elementos actuantes. Es por ello que a consideración del analista se debe agregar todo aquel elemento que aquí no se haya mencionado y se crea tenga alguna influencia sobre el caso particular de inundación. Con lo anterior se pretende identificar cuáles de estos factores fueron los fundamentalmente determinantes para que se presentara la eventualidad o bien para que ésta se viese agravada. Además es conveniente jerarquizarlos, pues así se tendrá un medio más eficiente para establecer objetivamente las causas y los efectos de la inundación, y las propuestas de acciones que ayuden a minimizar el riesgo de un evento similar en el futuro. Se debe tener en cuenta que a lo largo de todos los análisis se ha tenido un carácter estático, por lo que el aspecto dinámico de los factores externos actuantes será difícil de evaluar. Es importante recordar que no existen sistemas aislados sino en relación dinámica con otros elementos de un ambiente circundante, por lo que si se logra un adecuado acoplamiento de cada uno de los factores analizados, será posible tener un acercamiento a la realidad de lo sucedido, minimizando la incertidumbre.

D.4 Generación de mapas de inundación y determinación de afectaciones

Un mapa de inundaciones es el que demarca la intersección de los niveles del agua con la superficie del terreno correspondiente a caudales de interés. De esta manera se pueden delimitar las áreas que tienen diferentes niveles de riesgo, y prohibir o restringir la ocupación o el uso de los terrenos que tienen altos niveles de riesgo. Para la generación de los mapas de inundación bajo procedimientos automáticos es posible la aplicación de *software* que lleve a cabo en forma acoplada la modelación hidrológica e hidráulica hasta escalas a nivel de calles; o bien bajo procedimientos cuasi-automáticos, en donde será posible la generación de mapas de inundación utilizando modelaciones hidrológica e hidráulica separadas, y llevando una integración externa en conjunto con el *software* de SIG. Es sabido que los tipos de modelación que se realizan de forma separada incrementan los errores debidos a la manipulación y transferencia de la información, y se limita la capacidad del modelo acoplado para pronosticar niveles de inundación, pero ciertamente si cada uno de los modelos se aplica de forma adecuada, los errores serán mínimos. Entonces, la generación de los mapas de inundación será a través del siguiente procedimiento: se genera el MDE y se obtiene el mapa de las cuencas; en forma alterna y una vez más con el MDE y topografía a detalle, se obtiene el alineamiento de los cauces y características de los hombros y secciones transversales. Con el modelo hidrológico se obtienen los gastos, siendo éstos el insumo para el modelo hidráulico. Una vez hecha la simulación hidráulica, se obtienen los niveles de inundación en las secciones transversales; finalmente, estos niveles se procesan y se combina la información geográfica e hidráulica para generar la delimitación en planta de los mapas de inundación. Como ejemplo, en la figura 2 se muestra la extensión de la inundación en 2007 en las planicies de Tabasco.

Una vez generados los mapas de inundación teóricos a partir de la modelación,

éstos pueden compararse con la superficie real inundada, analizando las diferencias que ellos presentan, tratando de localizar zonas con mayor problemática y relacionándolas con todos los factores ya analizados anteriormente. De esta forma es posible establecer una relación entre dichos factores y las zonas de inundación. Los mapas de inundación teóricos servirán como elementos para la delimitación de las zonas de riesgo en forma generalizada y el mapa de la inundación estudiada servirá para la delimitación de las afectaciones que se hayan presentado. Esto permitirá establecer de manera objetiva las causas principales para que el evento se presentara con tal magnitud.

Una vez determinados los niveles que se presentaron en las zonas urbanas de acuerdo con la modelación hidráulica, se puede determinar el porcentaje de daño que se presenta

en relación con el tipo de que se trate: directos, esto es, en viviendas, centros educativos, infraestructura de salud, locales públicos, etcétera; indirectos, como el flujo de bienes, interrupción de servicios y sistemas de comunicación, y pérdidas de horas-hombre, entre otros; y los económicamente intangibles, como los damnificados en sí, los heridos y las pérdidas humanas. En el caso, por ejemplo, de los costos directos, el análisis de la afectación en asentamientos humanos incluye la determinación de las pérdidas económicas en viviendas, empresas y comercios, infraestructura, áreas de cultivo, vías de comunicación y actividades económicas. La metodología a seguir en este segmento se divide en dos acciones: la cuantificación de los bienes afectados como tal, por ejemplo, viviendas y escuelas afectadas, superficie de pavimento dañada, cultivos perdidos, etc., y la

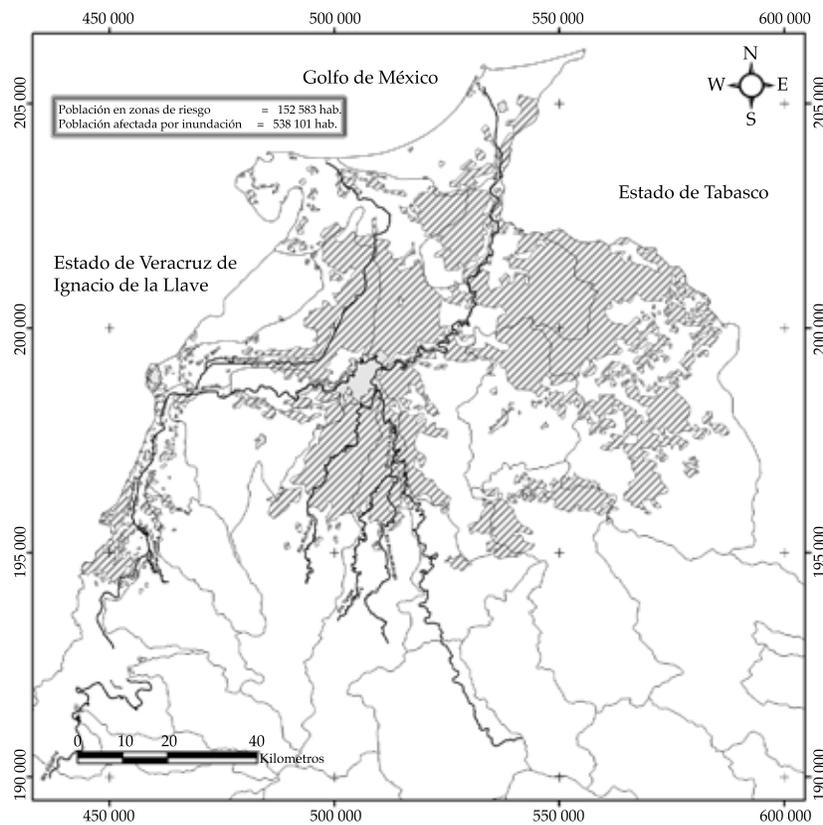


Figura 2. Extensión de la inundación de 2007 en Tabasco, México (Herrera, 2010).

propia cuantificación de costos de tales afectaciones. Para esta última se deben asignar costos unitarios a cada rubro de acuerdo con lo que establezcan las autoridades competentes para cada uno de ellos. En México, por ejemplo, se pueden seguir los criterios del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred, 2006a) para los daños tangibles y los de Iturre (2007) para los intangibles, y algún catálogo o sistema de costos unitarios de reparación u obra nueva, como el que mantiene Conagua (Conagua, 2004).

Fase E. Diagnóstico final

Con el diagnóstico final se busca llegar de forma objetiva a la identificación de los factores que tuvieron un funcionamiento diferente a lo natural o esperado, y con ello jerarquizarlos y ponderar el nivel de falla de cada uno. Al realizar una matriz de factores y darles valor a cada uno de acuerdo con las causas, se estará en posibilidad de determinar de manera objetiva los factores de fallo y será posible disponer acciones necesarias para mitigar el impacto de fenómenos posteriores que pudieran presentarse.

E.1 Contraste con eventos históricos

Con base en el historial de los eventos de inundación y destrucción que han azotado a la zona de estudio, las memorias en medios de comunicación y testimonios personales tanto de los afectados como observadores y autoridades, se debe integrar un documento que permita el análisis en forma rústica, esto es, un análisis muy genérico. Sin embargo, si se tienen análisis completos de eventos anteriores, sin duda alguna se deben usar. Con esto es posible realizar una comparación entre estos eventos y el que se está analizando actualmente, con la finalidad de encontrar factores de influencia recurrentes para la presentación de eventos de inundación en la zona de estudio con magnitudes similares o en un rango de asociación. Ello dará la pauta para poder aseverar si las acciones estructurales y no estructurales han sido

aplicadas de manera adecuada a lo largo de la historia de la zona de estudio o resulta necesaria la aplicación de otras acciones no contempladas anteriormente.

E.2 Resumen objetivo de causas y efectos

El análisis integrado de los factores técnicos (hidrometeorológicos, hidrológicos e hidráulicos), junto con las dimensiones sociales y económicas, explicados anteriormente, permitirán establecer un dictamen objetivo de la causas y efectos. El resultado ofrecerá evidencia documentada de qué tan extraordinario fue el evento desde el punto de vista probabilístico y qué tanto los otros factores externos contribuyeron a la magnificación de los impactos de la inundación. En este sentido, deberá quedar claro, por ejemplo, hasta qué punto una deficiente operación de la infraestructura pudo haber sido causante de los daños; si el principal motivo de éstos fue la ocupación ilegal de zonas de alto riesgo, o si los daños fueron generados por lluvias y escurrimientos con altos periodos de retorno. Es importante notar que en la mayoría de los casos, una combinación de todos los factores puede ser la mejor explicación posible. En ese caso será recomendable establecer una ponderación de las causas, procurando, por supuesto, que ésta se realice con base en los hallazgos objetivos del análisis.

E.3 Lecciones aprendidas y acciones propuestas

Sin duda, una de las mejores forma de capitalizar los hallazgos y resultados del análisis forense de un evento de inundación estriba en la oportunidad de aprendizaje y en el potencial planteamiento de acciones orientadas a evitar o al menos disminuir los daños potenciales por eventos similares (Aparicio, Martínez-Austria, Güitrón, & Ramírez, 2009). Entre los aprendizajes de un estudio forense se encuentran las respuestas a las siguientes preguntas:

¿Qué tan extraordinario fue el evento causante de la inundación? ¿Qué probabilidad

de excedencia se puede asignar a lluvias y escurrimientos? ¿En qué medida el aviso oportuno de la magnitud del evento habría disminuido los daños? ¿La mayor parte de los daños se generaron en zonas inundables y planicies invadidas? ¿Qué rol desempeñó la infraestructura hidráulica tanto en el manejo positivo del evento como en la potencial magnificación de los impactos? En caso de existir infraestructura operable, ¿la política de operación fue la preestablecida en casos de avenidas extremas? ¿El diseño hidráulico de la infraestructura fue el adecuado? ¿Se han respetado los planes de desarrollo urbano? ¿Éstos están adaptados para el caso de inundaciones? En caso de que exista ¿es necesario hacer adaptaciones al atlas de riesgos por inundación? ¿En qué medida la falta de conservación en las cuencas aportadoras se relacionó con los daños generados por el evento? ¿Qué tan adecuada fue la respuesta a la emergencia? ¿Fue favorable la coordinación entre instituciones?

Se esperaría que el análisis forense brindara los elementos necesarios y suficientes para que las autoridades o los tomadores de decisiones establecieran programas orientados a la atención y el control de estos fenómenos en el futuro. Aunque esto en cierta medida se ha dado, sería deseable que el proceso se apoyara en reportes objetivos con base técnica. En la ciudad de Monterrey, por ejemplo, posterior a los daños observados durante el embate del huracán *Gilberto*, en 1988, se construyó una presa de control de avenidas, conocida como Presa Rompepicos, en una de las principales cuencas de aportación del río Santa Catarina, mismo que cruza por la zona urbana. Gracias a esa infraestructura, los daños por inundaciones generados por la tormenta tropical *Alex* en 2010 fueron aliviados en cierta magnitud (Ramírez, 2011).

Otro producto del análisis forense lo constituye, sin duda, la propuesta de acciones orientadas a la disminución de los daños generados por las inundaciones en el futuro. Por supuesto, aunque existen siempre ideas generales, la relación concreta de posibles

cursos de acción dependerá del caso particular del que se trate. Sin embargo, sólo por enumerar algunas, se podría trabajar en lo siguiente:

- Reforzamiento de la red de monitoreo hidrológico e hidrometeorológico.
- Implementación de un sistema de alerta temprana (hidrológico).
- Revisión y adaptación de políticas de operación de infraestructura.
- Revisión de la capacidad hidráulica en puentes y otras obras de drenaje.
- Revisión de la vulnerabilidad de infraestructura urbana (vial, abastecimiento, drenaje, tratamiento, etc.).
- Determinación del grado de vulnerabilidad de los asentamientos regulares e irregulares frente a inundaciones.
- Verificación del estado de los arroyos y cauces ante la posibilidad de obstrucciones e invasiones.
- Desarrollo de un atlas de riesgos contra inundaciones.
- Proyecto de obras y acciones para el control de las inundaciones.
- Incorporación de criterios hidrológicos en los planes de desarrollo urbano.
- Planteamiento de acciones de reforestación y control de suelo en las cuencas altas.
- En el ámbito urbano, estimular el uso de medidas de control en la fuente con buenas prácticas, como los clasificados como “sistemas sostenibles de drenaje urbano”.
- Revisión de planes de coordinación entre los diferentes niveles de gobierno.

Duración sugerida de las etapas

Con base en el alcance de cada etapa y en la experiencia en el desarrollo y la supervisión de proyectos relacionados con el manejo de las inundaciones, se ha establecido, en forma orientativa, la duración requerida en el desarrollo del análisis forense de una inundación. El cuadro 2 muestra las fases y etapas, y la conveniencia de que sean completadas en las tres ventanas de tiempo: antes, durante y después del evento inundante, motivo de análisis.

Órdenes de magnitud de los daños por inundación

Los daños asociados con inundaciones son muy variables y en general dependen de la severidad del evento y de la vulnerabilidad de los sistemas. En México, por ejemplo, los últimos daños importantes asociados con inundaciones se presentan en el cuadro 3.

Como se puede observar, los daños por inundaciones han costado gran cantidad de dinero, que en buena medida ha sido aportado por el Fondo de Desastres Naturales (Fonden) o el Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climáticas (FA-PRACC). Sería deseable, por ejemplo, que en lugar de intentar tener acceso a estos fondos, la visión en torno al problema de las inundaciones se centrara en programas como el Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (Fopreden), que es un instrumento orientado a la

prevención más que a la atención de las emergencias.

Conclusiones

Son muy pocos los casos en los cuales es posible solucionar los problemas de inundaciones de forma permanente. Algunas de las razones más importantes que no permiten la solución son el costo de las obras, los conflictos socioeconómicos de las regiones que conllevan intereses en el uso de la tierra y la escasa factibilidad económica de este tipo de proyectos. Por esta razón se utilizan los términos “Control de inundaciones” o “Mitigación de los efectos por inundaciones”, para indicar que estos proyectos tratan de prevenir daños mayores y ofrecen protección hasta un cierto nivel de riesgo. Es inevitable que el control y la mitigación de los efectos por inundaciones sean precedidos por un análisis integral de los eventos que acontecieron

Cuadro 2. Duración sugerida para completar las etapas y fases de un análisis forense de inundaciones.

Fase	Etapa	Antes	Durante	Después			
				Una semana	Un mes	De tres a seis meses	Hasta un año
A. Recopilación e integración de información	A.1	✓	✓	✓	✓		
	A.2	✓					
	A.3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	A.4	✓					
B. Análisis hidrológico	B.1			✓			
	B.2	✓			✓		
	B.3	✓					
	B.4	✓			✓		
	B.5				✓		
	B.6				✓		
	B.7	✓				✓	
C. Análisis hidráulico	C.1	✓			✓	✓	
	C.2			✓	✓		
D. Análisis integrador	D.1	✓					
	D.2			✓			
	D.3					✓	
	D.4					✓	
E. Diagnóstico final	E.1					✓	
	E.2					✓	
	E.3					✓	✓

Cuadro 3. Algunos daños asociados con inundaciones en México.

Evento	Año	Monto de daños (millones de pesos)	Referencia
Huracanes <i>Wilma</i> y <i>Stan</i>	2005	39 832	Cenapred (2006b)
Huracán <i>Emily</i>	2005	8 872	Cenapred (2006c)
Inundaciones en Tabasco y Chiapas	2007	31 871	CEPAL (2008)
Tormenta tropical <i>Alex</i> en Nuevo León	2010	16 249	CERNL (2014a) CERNL (2014b)

en el pasado en una zona, ello dará las pautas para focalizar acciones necesarias y lograr los alcances proyectados. Para reducir los factores que influyen en la magnitud del impacto por inundación hay que articular el nivel local con el nivel regional. Las causas y los efectos relacionados con la vulnerabilidad de una zona van más allá del ámbito local. De la misma manera, las acciones correctivas y prospectivas deben tener una aplicación en el nivel de cuencas. La coordinación entre los niveles de gobierno implica acciones de articulación y consistencia de proyectos. Para la implementación del enfoque de mitigación del impacto de desastre por inundación es determinante la coherencia entre los planes municipales, estatales y regionales, la cual permite tener una visión integral del territorio. Es importante considerar la aplicación de medidas estructurales y no estructurales. En relación con las medidas estructurales, se pueden realizar acciones, como el refuerzo de estructuras existentes, reubicación de viviendas, de infraestructura o centros de producción ubicados en zonas de amenaza. Las medidas no estructurales pueden ser activas o pasivas. Las medidas activas son aquellas que promueven la interacción directa con las personas, como la organización para atención de emergencias, el desarrollo y fortalecimiento institucional, la educación formal y capacitación, las campañas de difusión, la participación comunitaria y la gestión en el nivel local. Las medidas pasivas están más relacionadas con la legislación y la planificación: normas de construcción y expedición de códigos de construcción, reglamentos de uso de suelo, estímulos fiscales y promoción de seguros. Estas medidas no requieren de sig-

nificativos recursos económicos y, por tanto, son muy propicias para consolidar los procesos proyectados para la mitigación de efectos por inundaciones. En conclusión, las acciones resultado del análisis deben ser congruentes con el factor influyente en la magnitud del desastre analizado. Cualquiera que sea el factor para que la inundación sea un hecho, es altamente recomendable considerar la cultura de la contratación de seguros. En realidad, la contratación de un seguro no es ni más ni menos que la necesidad de cubrirse por eventualidades o siniestros, es decir, por lo que eventual y fortuitamente ocurra. El 90% de la gente tiene asegurado su auto, y aun así no existe un porcentaje tal de gente que tenga asegurada su casa.

Este artículo presenta una guía metodológica para el análisis forense de las inundaciones de una forma completamente objetiva, con el ánimo general de que contribuya al planteamiento de acciones orientadas a evitar o al menos disminuir los daños generados por estos fenómenos naturales.

Referencias

- Aldama, A., Ramírez, A., Aparicio, J., Mejía, R., & Ortega, G. (2006). *Seguridad hidrológica de las presas en México*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Aparicio, J. (2005). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, DF: Editorial Limusa.
- Aparicio, J., Martínez-Austria, P., Güitrón, A., & Ramírez A. (2009). Floods in Tabasco, Mexico: A Diagnosis and Proposal for Courses of Action. *Journal of Flood Risk Management*, 2(2), 132-138.
- Blick, E. F (1991). *A Scientific Analysis of Genesis*. Oklahoma City: Hearthstone Publishing.

- Cenapred (2006a). *Guía básica para la elaboración de atlas municipales de peligros y riesgos. Fenómenos Hidrometeorológicos*. México, DF: UNAM.
- Cenapred (2006b). *Características e impacto socioeconómico de los huracanes "Stan" y "Wilma" en la república mexicana en el 2005*. Documento LC/MEX/L.751. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres. Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas.
- Cenapred (2006c). *Características e impacto socioeconómico del huracán "Emily" en Quintana Roo, Yucatán, Tamaulipas y Nuevo León en julio de 2005*. Documento LC/MEX/L.693. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres. Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas.
- CEPAL (2008). *Tabasco: características e impacto socioeconómico de las inundaciones provocadas a finales de octubre y a comienzos de noviembre de 2007 por el frente frío número 4*. Documento LC/MEX/L.864. México, DF: Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas, Secretaría de Gobernación México, Gobierno del Estado de Tabasco, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CERNL (2014a). *Consejo Estatal para la Reconstrucción de Nuevo León*. Gobierno del Estado de Nuevo León. Recuperado de <http://www.reconstruccionnl.org.mx>.
- CERNL (2014b). *Juntos reconstruyendo Nuevo León*. En *Memorias del Consejo Estatal para la Reconstrucción de Nuevo León*. Gobierno del Estado de Nuevo León. Recuperado de www.conl.mx.
- Chow, V. (1994). *Open Chanel Hydraulics*. Singapore: McGraw-Hill International Editions.
- Conagua (2004). *Sistema de Consulta del Manual de Costos Estimados para Proyectos de Infraestructura Hidráulica 2004. Versión 2*. México, DF: Gerencia de Evaluación y Programación, Subdirección General de Programación, Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (2007). *Manual de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario. Alcantarillado Sanitario*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- DGPC (2006). *Manual de Organización y Operación del Sistema Nacional de Protección Civil*. México, DF: Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación.
- Eagleson, P. (1972). Dynamics of Flood Frequency. *Water Resources Research*, 8(4), 878-898.
- Escalante, C., & Reyes, L. (2005). *Técnicas estadísticas en hidrología*. México, DF: Facultad de Ingeniería de la UNAM.
- Esparza, J. (2005). *La influencia de la longitud del registro en las estimaciones de gastos de diseño en México*. Tesis de maestría. México, DF: UNAM.
- Gutiérrez, A., Aparicio, J., & León, J. (2005). Modelación del régimen pluviométrico en la ciudad de Morelia. Cap. 2. En A. Gutiérrez, A. Ramírez, & F. Sánchez (Eds.). *Las ciencias del agua en Morelia. Aplicaciones frente a los retos del siglo XXI*. México, DF: IMTA-UMSNH.
- Haan, C. (1986). *Statistical Methods in Hydrology*. Iowa: The Iowa State University Press.
- Herrera, A. (2010). *Guía metodológica para el análisis forense de inundaciones*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. México, DF: UNAM.
- Holický, M., & Sýkora, M. (2009). Forensic Investigation for Fluvial Flood Damage in the Czech Republic. In *Proceedings of ICE-Civil Engineering*, 162(5), Institution of Civil Engineers, UK.
- Hurst, R. (2007). An Overview of Forensic Hydrology. *Southwest hydrology*, 6(4), 16-17.
- Iturre, H. (2007). *Valor social del tiempo*. México, DF: CEPEP.
- Kite, G. W. (1988). *Flood and Risk Analyses in Hydrology*. Littleton, USA: Water Resources Publications.
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1990). *Hidrología para Ingenieros*. México, DF: McGraw-Hill.
- Maza, J. (1987). *Introduction to River Engineering*. México, DF: UNAM, División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería.
- NRCS (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55. Washington, DC: Natural Resources Conservation Service, USDA.
- Ramírez, A. (2011). *Evaluación del funcionamiento de la presa Rompe Picos*. Reporte técnico que forma parte integral del Informe del Proyecto "Reconstrucción del río Santa Catarina después del huracán Alex", contratado por la Comisión Nacional del Agua. México, DF: ITESM.
- Ramírez, A. (2012). *Hidrología esencial*. México, DF: Editorial Digital, ITESM.
- Ramírez, A., & Aldama, A. (2000). *Análisis de frecuencias conjunto para la estimación de avenidas de diseño*. México, DF: AMH, IMTA.
- UNESCO (2008). *Floods*. Recuperado del sitio de Internet de la UNESCO, http://portal.unesco.org/science/en/ev.phpURL_ID=6012&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html.

Dirección institucional de los autores

Dr. Aldo I. Ramírez

Centro del Agua para América Latina y el Caribe, México
 Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
 Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur
 Colonia Tecnológico Edificio CEDES
 64849 Monterrey, Nuevo León, México
 Teléfono: +52 (818) 3582 000, extensión 5560
 aldo.ramirez@itesm.mx

M.I. Lucía Alejandra Herrera Lozano

Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de San Miguel de Allende
 Prolongación Alcozer núm. 2
 Fracc. La Conspiración
 37740 San Miguel de Allende, Guanajuato, México
 Teléfono: +52 (415) 1524 429, extensión 108
 alexa.hidraulica@gmail.com